

Solare Energieversorgung

Robert Pitz-Paal, DLR Institut für Solarforschung

mit Beiträgen von

Bernd Rech, HZB

Reiner Buck, Peter Heller, Franz Trieb, DLR

Thomas Wetzel, KIT

A large, high-resolution image of the Earth from space occupies the bottom right portion of the slide. It shows a curved horizon of the planet with a deep blue atmosphere. Below the horizon, the surface is visible, showing white polar ice caps, swirling white clouds, and green landmasses. The text "Knowledge for Tomorrow" is overlaid on this image in a white, sans-serif font.

Knowledge for Tomorrow

Übersicht

1. Warum Solarenergienutzung massiv ausbauen ?
2. Markt und Kostenentwicklung bei der PV
3. Markt und Kostenentwicklung bei der CSP mit Speicher
4. Szenarien für den Mix aus PV und CSP
5. Fazit

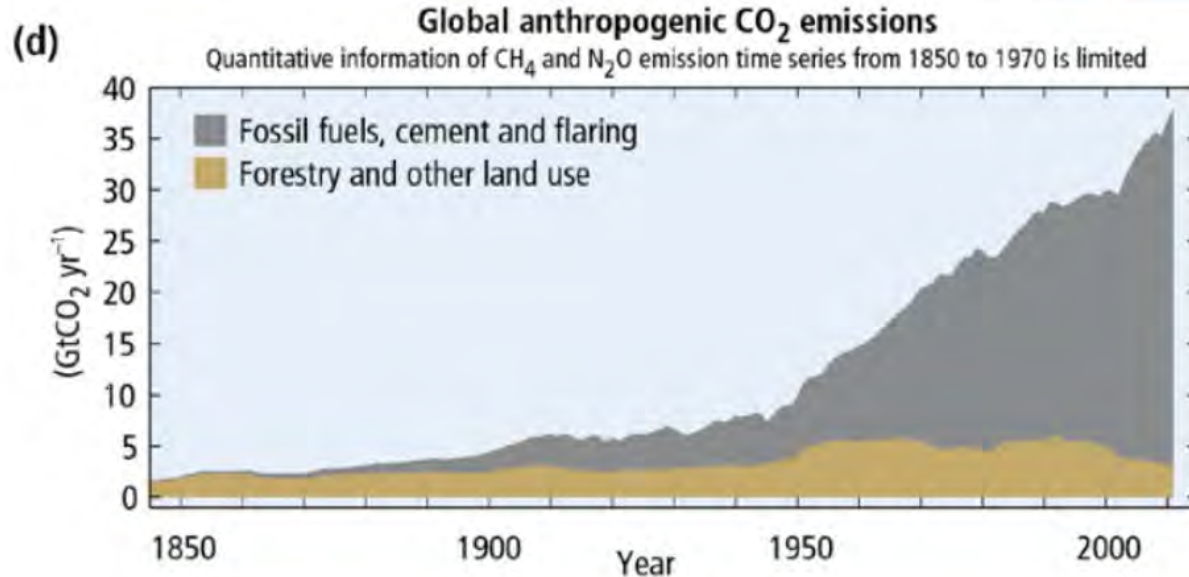


Übersicht

1. **Warum Solarenergienutzung massiv ausbauen ?**
2. Markt und Kostenentwicklung bei der PV
3. Markt und Kostenentwicklung bei der CSP mit Speicher
4. Szenarien für den Mix aus PV und CSP
5. Fazit



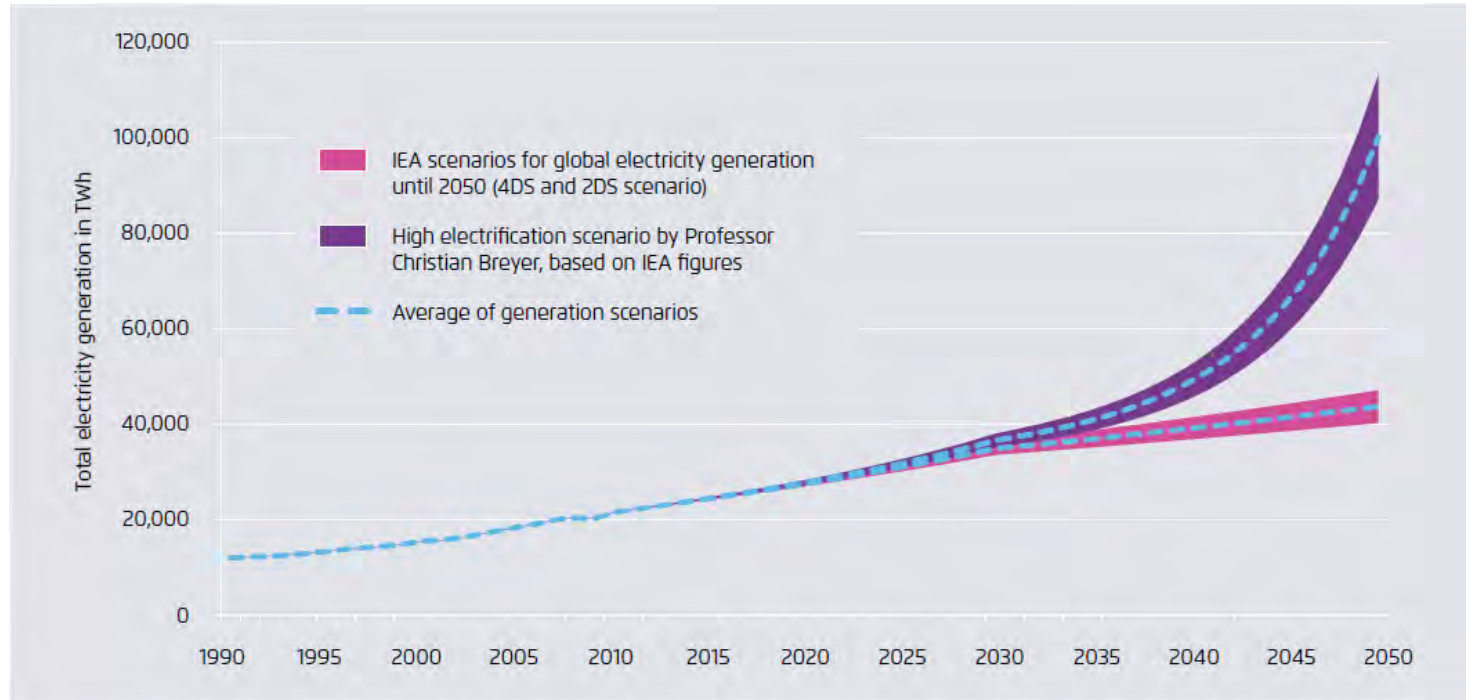
65% of our carbon budget compatible with a 2°C goal already used



Amount
Remaining:
1000
GtCO₂

AR5 WGI SPM

Gleichzeitig steigt der Energiebedarf weiter an: hier Elektrizität

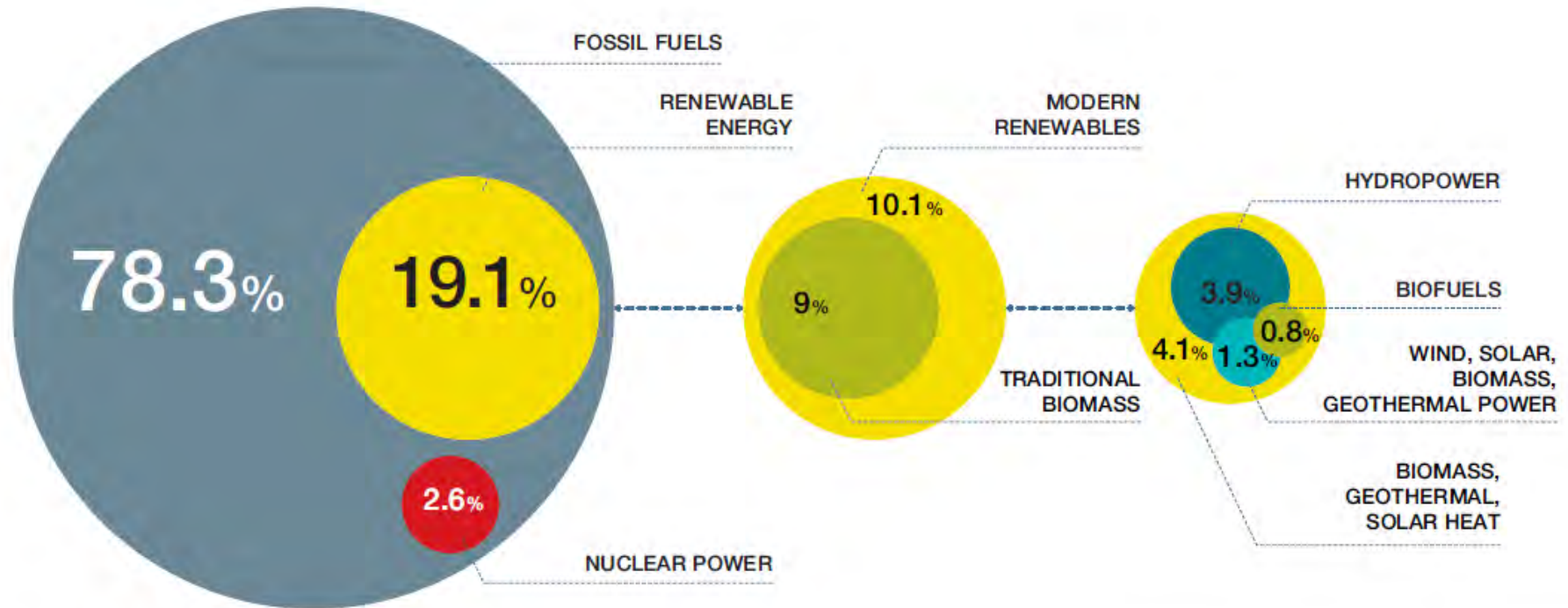


Own illustration, data from IEA [5] [6]

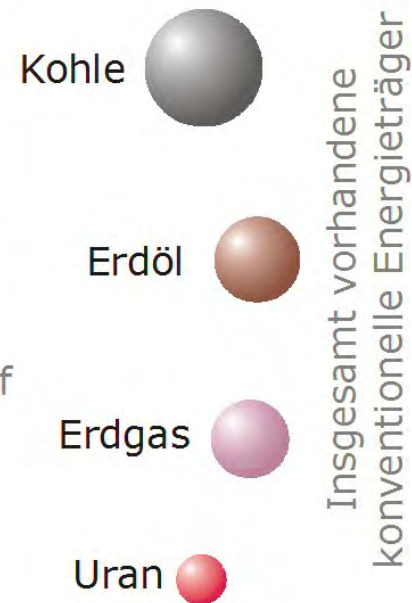
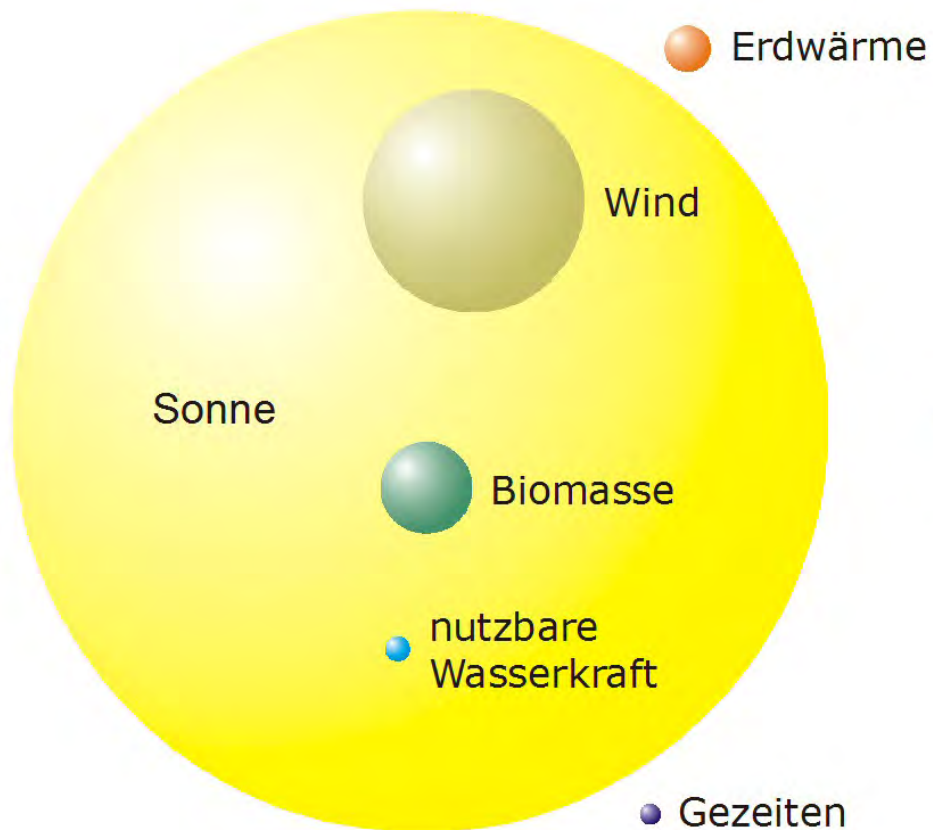
Fraunhofer ISE (2015): Current and Future Cost of Photovoltaics. Long-term Scenarios for Market Development, System Prices and LCOE of Utility-Scale PV Systems. Study on behalf of Agora Energiewende.



Primärenergieeinsatz 2014



Jährliches regeneratives
Energieangebot

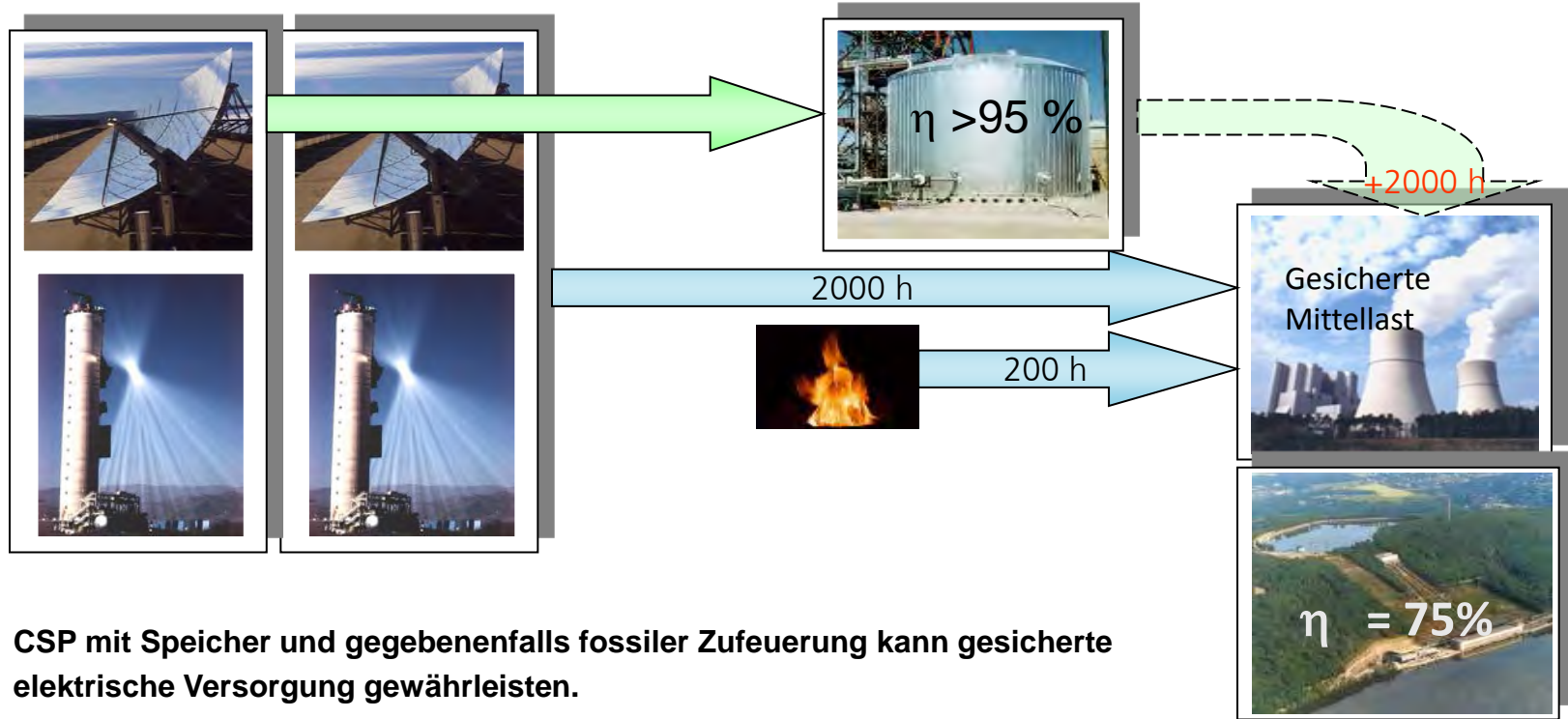


Charakteristik



Nutzen	Direkte und diffuse Strahlung	Direkte Strahlung
Blockgröße	mWatt bis einige 100 MW	10 MW bis einige 100 MW
Installation:	überall (Dächer etc.)	Flaches ungenutztes Land
Kapazität:	700 – 2000 Volllast-Stunden	2000 – 7000 Volllast-Stunden
Reserve Kapazität:	Extern	therm. Speicher + foss. Betrieb
Inst. Leistung (2015)	227 GW	5 GW
Strompreis	0,03 – 0,13 €/kWh	0,06 – 0,20 €/kWh

Thermischer Speicher gegenüber elektrischem Speicher



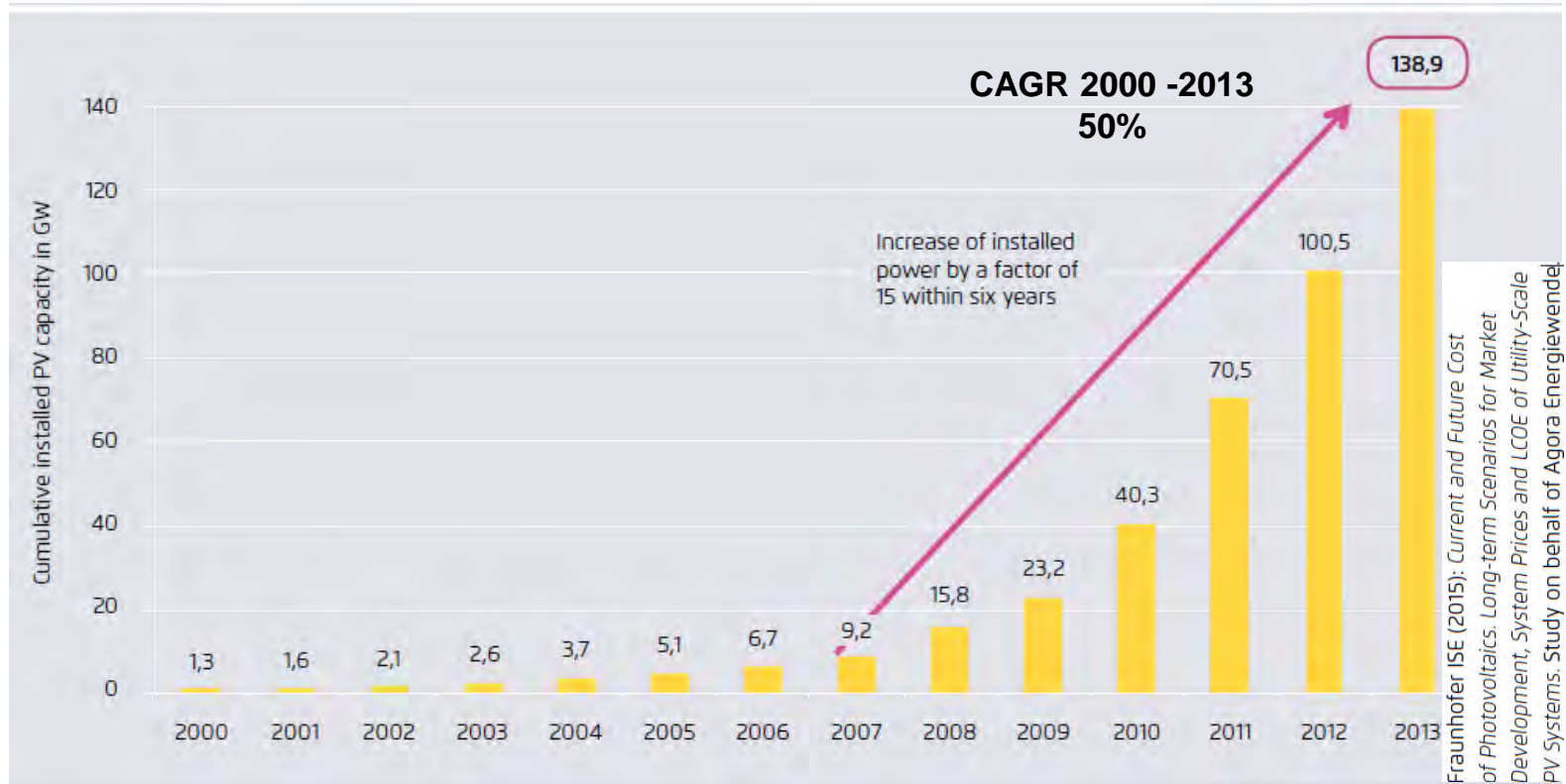
CSP mit Speicher und gegebenenfalls fossiler Zufeuerung kann gesicherte elektrische Versorgung gewährleisten.

Übersicht

1. Warum Solarenergienutzung massiv ausbauen ?
- 2. Markt und Kostenentwicklung bei der PV**
3. Markt und Kostenentwicklung bei der CSP mit Speicher
4. Szenarien für den Mix aus PV und CSP
5. Fazit

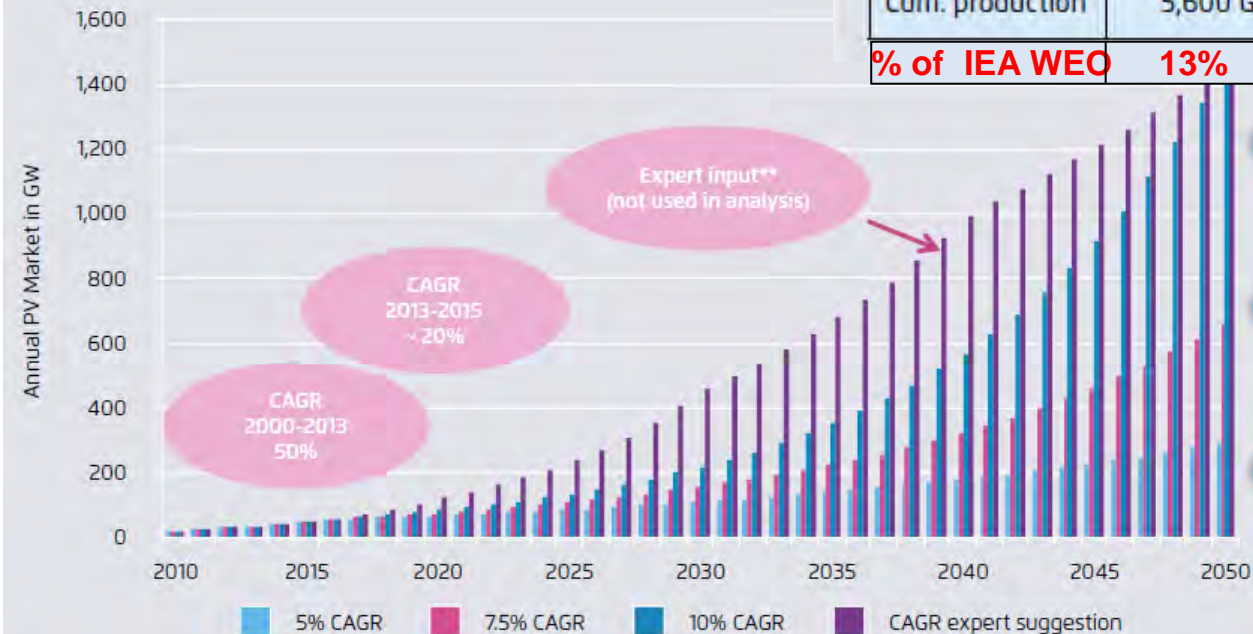


Weltweit installierte PV Kapazität



Szenarien für globalen PV Ausbau

Scenario	5% CAGR	7.5% CAGR	10% CAGR
Installed in 2050	4,300 GW	7,900 GW	14,800 GW
Cum. production	5,600 GW	9,600 GW	16,700 GW
% of IEA WEO	13%	24%	44%



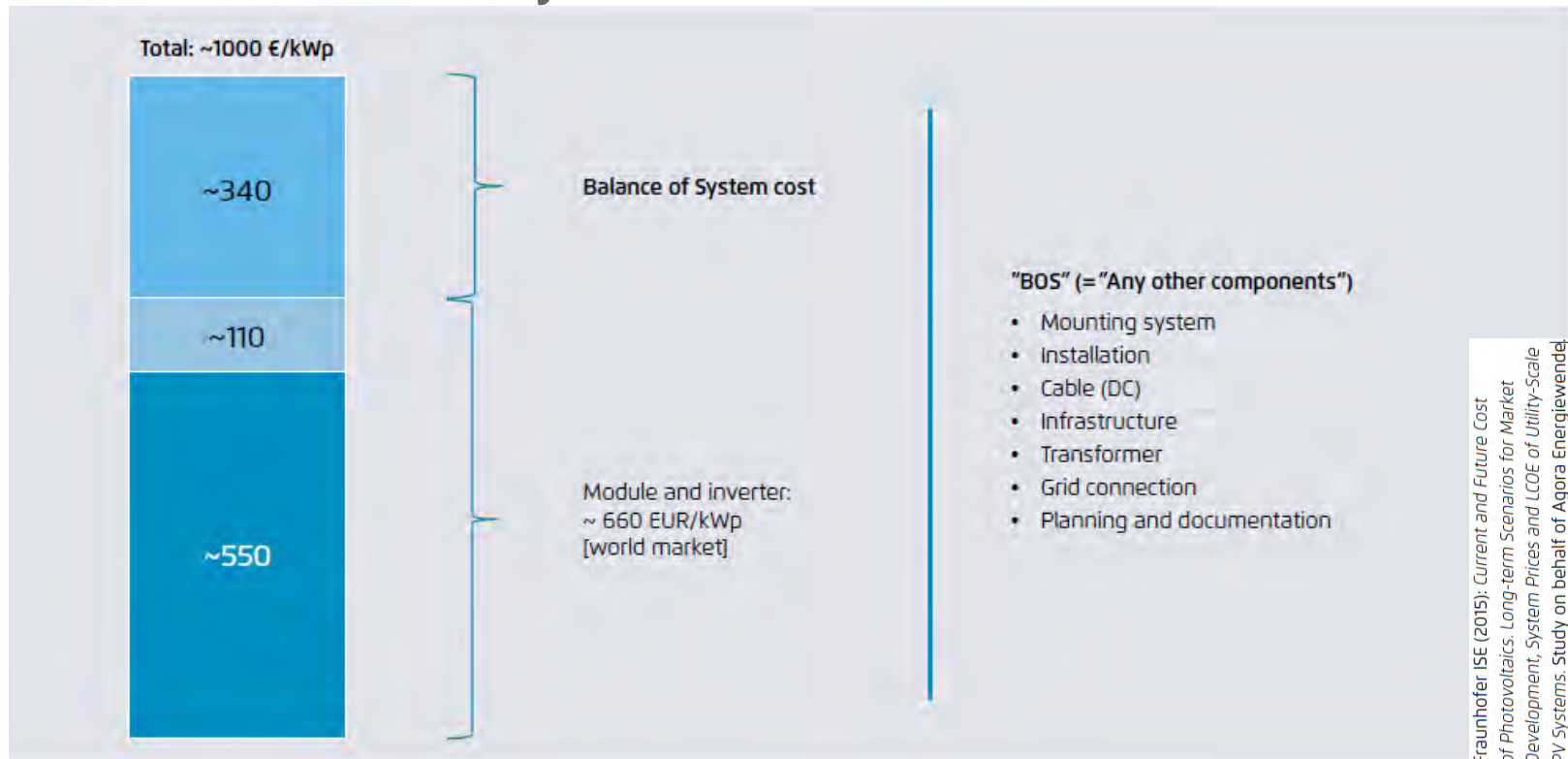
Own illustration

* CAGR = Compound Annual Growth Rate; ** Suggested market growth by year: 2014-2020: ~20%; 2020-2030: 14%; 2030-2040: 8%; 2040-2050: 4%; Considered by applying the S-curve approach to all scenarios

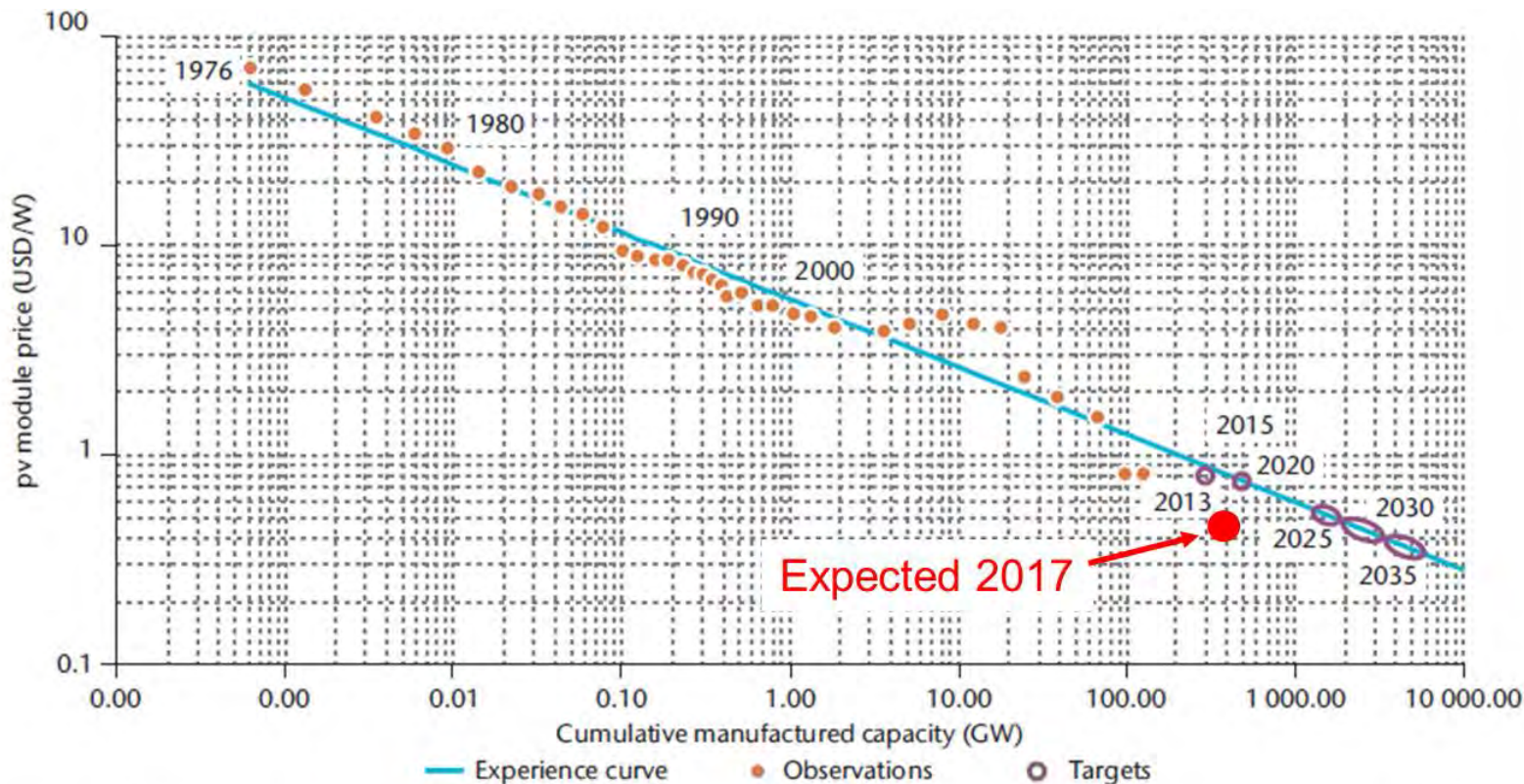
Fraunhofer ISE (2015): Current and Future Cost of Photovoltaics. Long-term Scenarios for Market Development, System Prices and LCOE of Utility-Scale PV Systems. Study on behalf of Agora Energiewende



Kostenstruktur von PV Systemen

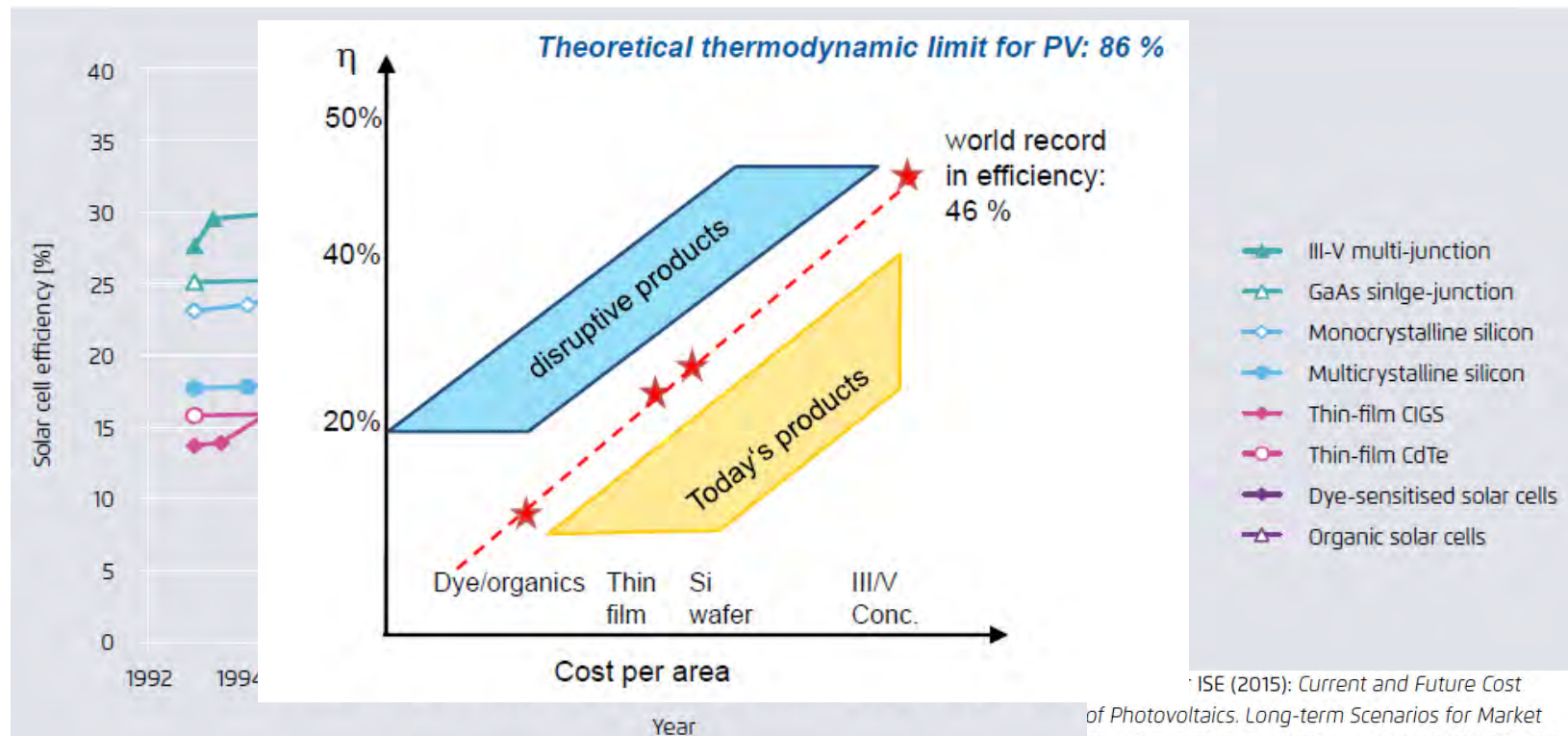


Lernrate für PV Module



Notes: Orange dots indicate past module prices; purple dots are expectations. The oval dots correspond to the deployment starting in 2025, comparing the 2DS (left end of oval) and 2DS hi-Ren (right end).

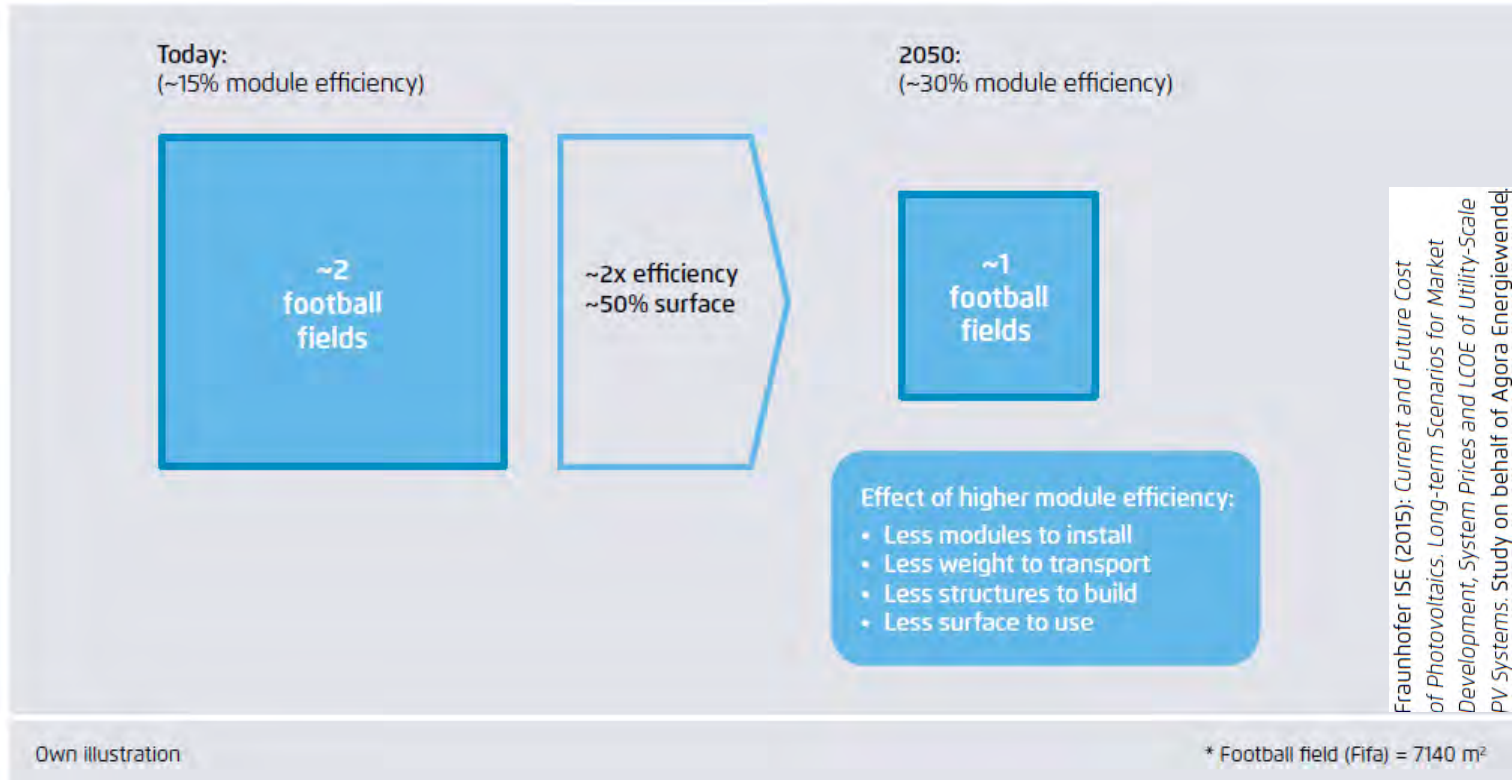
Effizienz der Solarzelle ist einer der Treiber für Kostensenkung



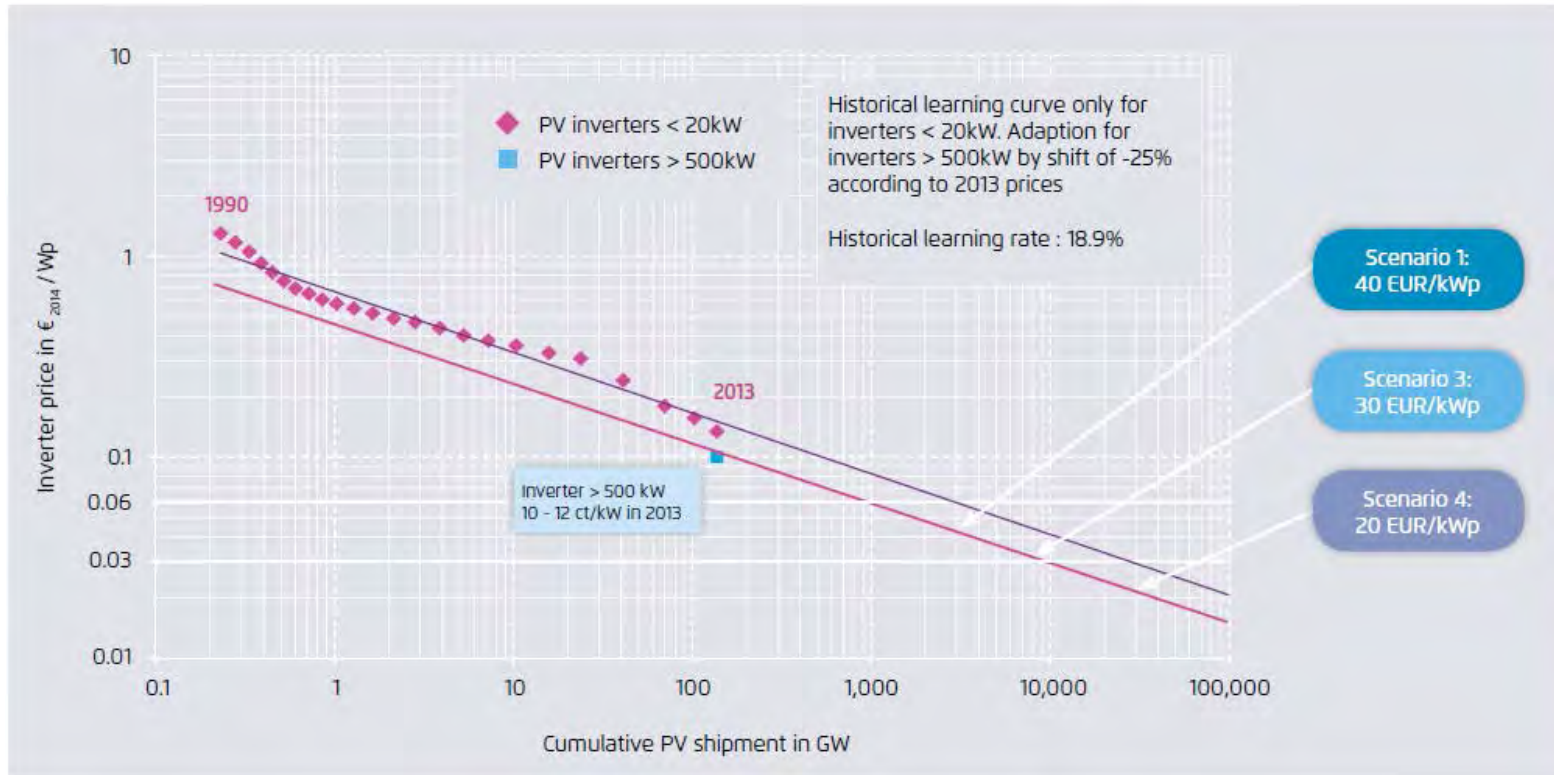
ISE (2015): *Current and Future Cost of Photovoltaics. Long-term Scenarios for Market Development, System Prices and LCOE of Utility-Scale PV Systems.* Study on behalf of Agora Energiewende.



Zell-Effizienz hat wesentlichen Einfluss auf BOS Kosten

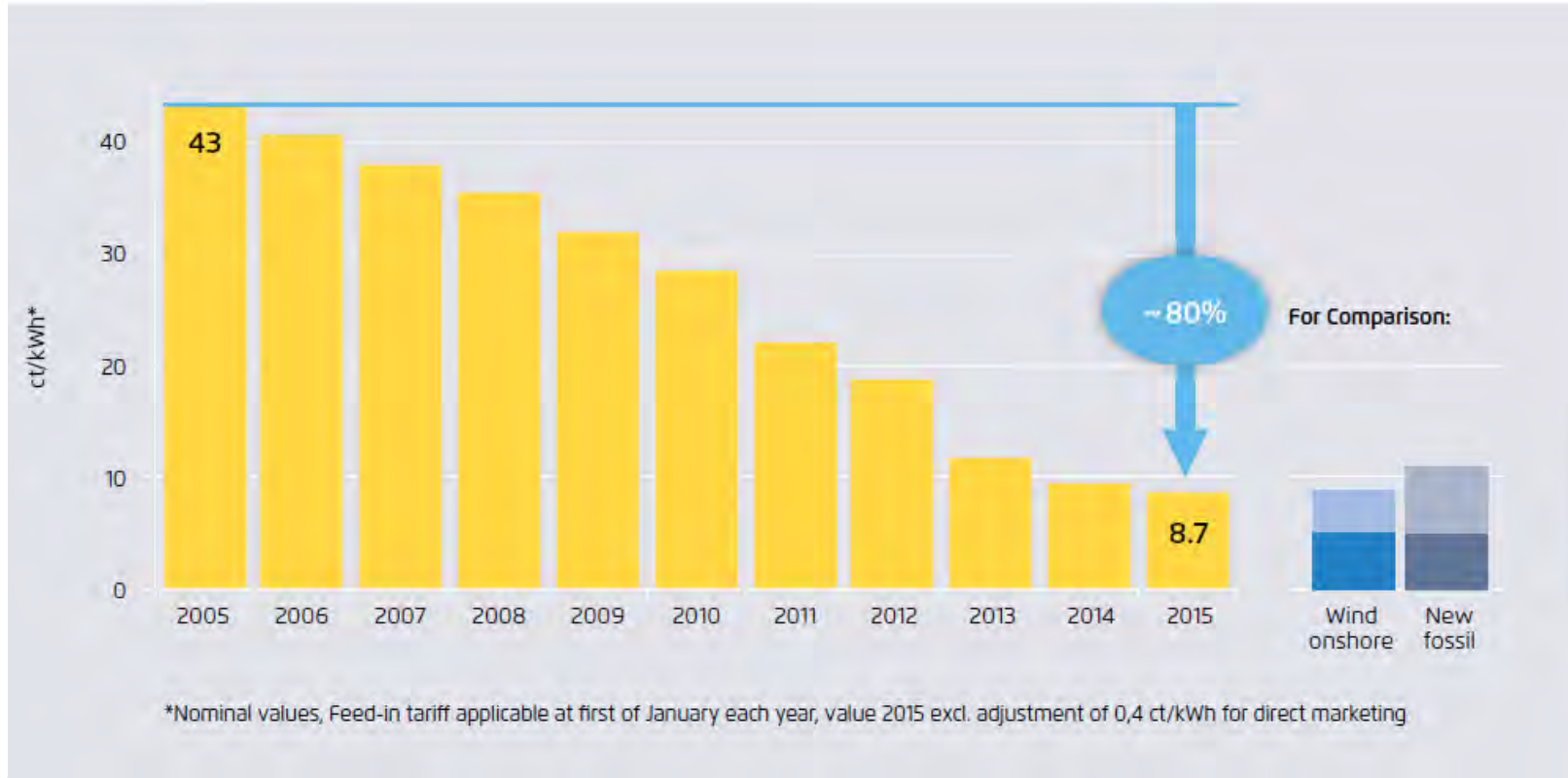


Lernkurve für Inverter



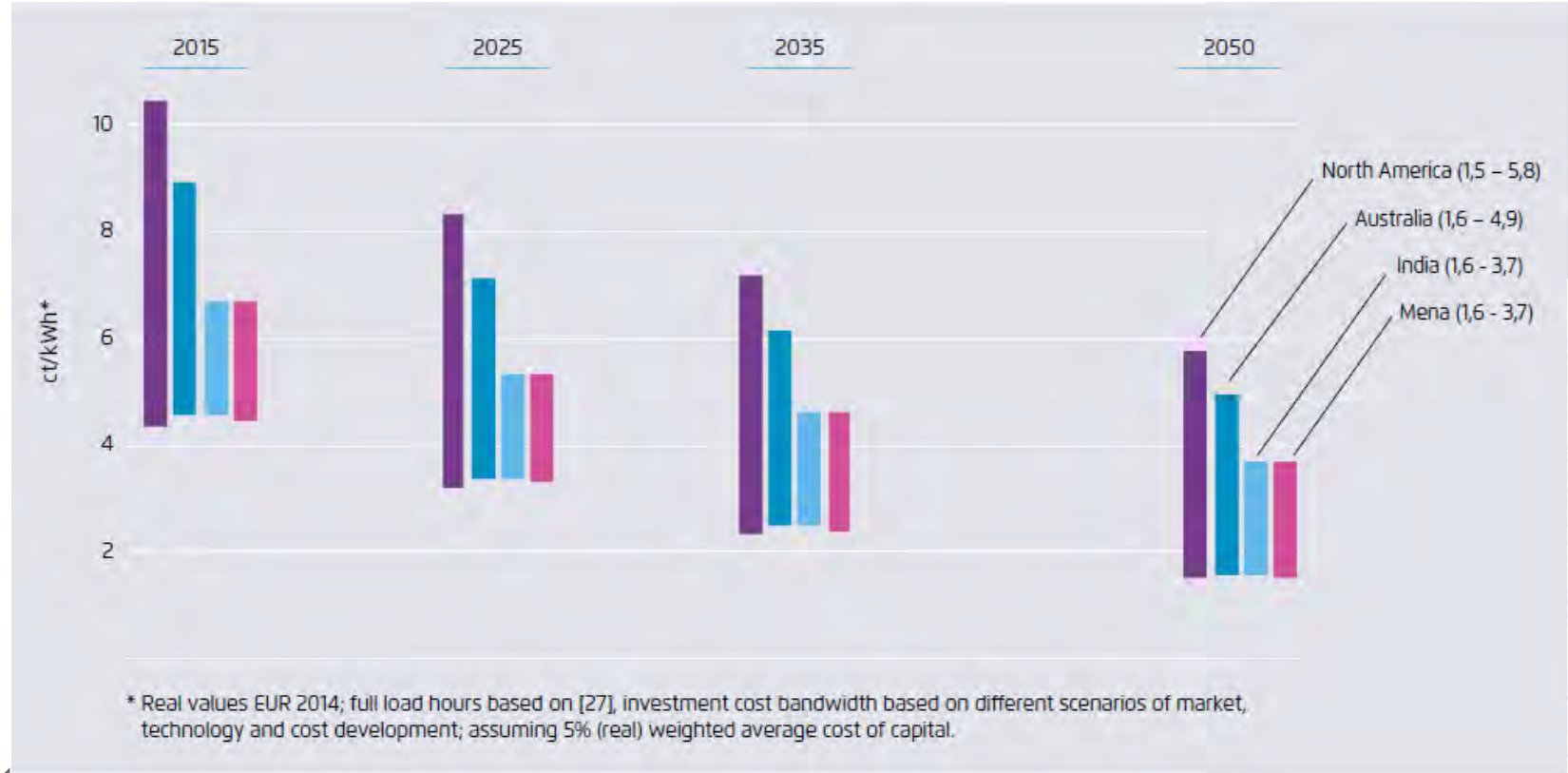
Fraunhofer ISE (2015): Current and Future Cost of Photovoltaics. Long-term Scenarios for Market Development, System Prices and LCOE of Utility-Scale PV Systems. Study on behalf of Agora Energiewende

Entwicklung der EEG Einspeisevergütung



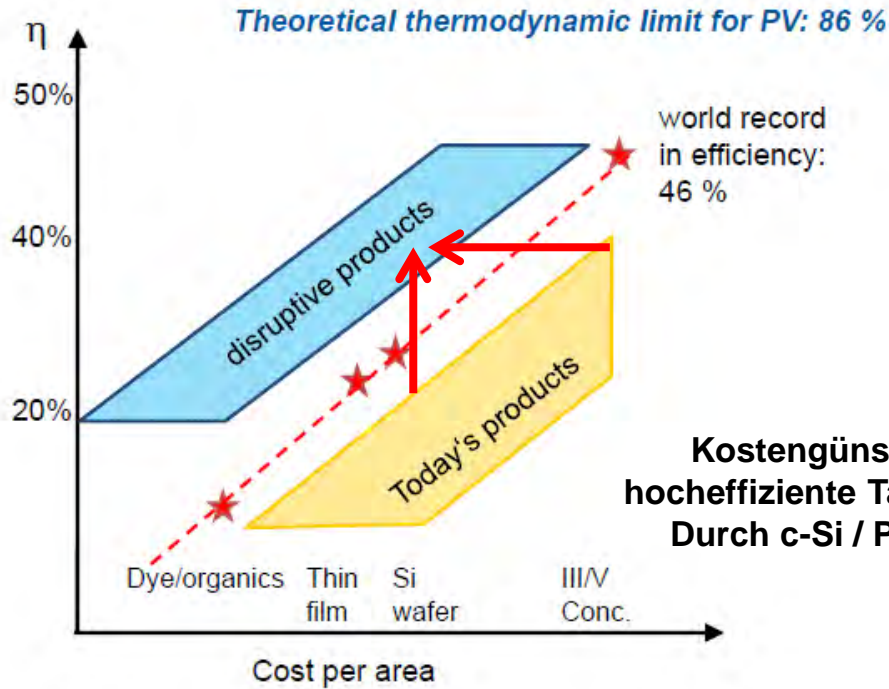
Fraunhofer ISE (2015): Current and Future Cost of Photovoltaics. Long-term Scenarios for Market Development, System Prices and LCOE of Utility-Scale PV Systems. Study on behalf of Agora Energiewende

Erwartete PV Kostenentwicklung

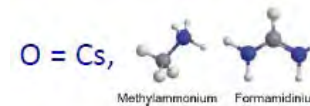
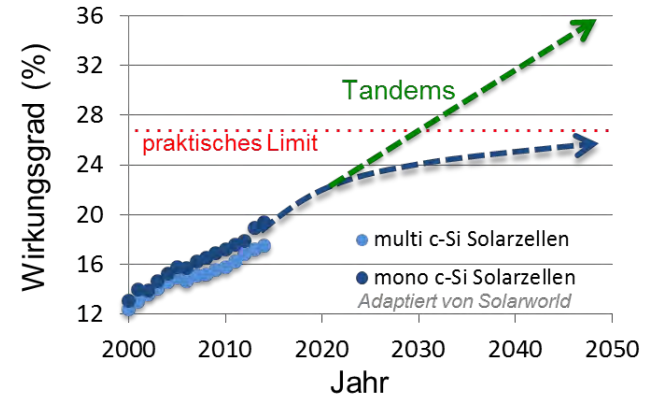


Fraunhofer ISE (2015): Current and Future Cost of Photovoltaics. Long-term Scenarios for Market Development, System Prices and LCOE of Utility-Scale PV Systems. Study on behalf of Agora Energiewende.

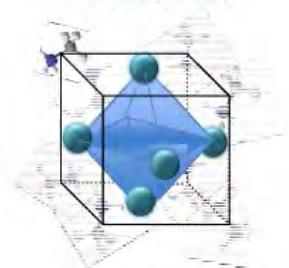
HGF verfolgt disruptive Ansätze



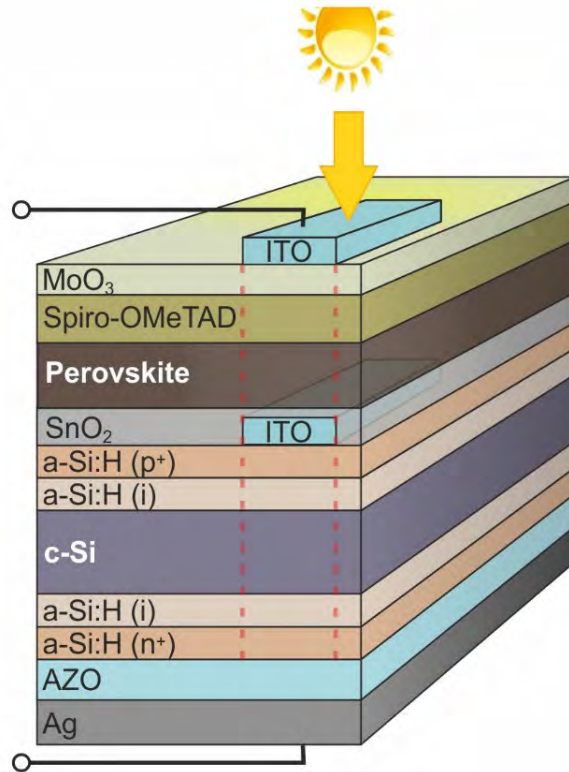
**Kostengünstige und hocheffiziente Tandemzellen
Durch c-Si / Pervoskite**



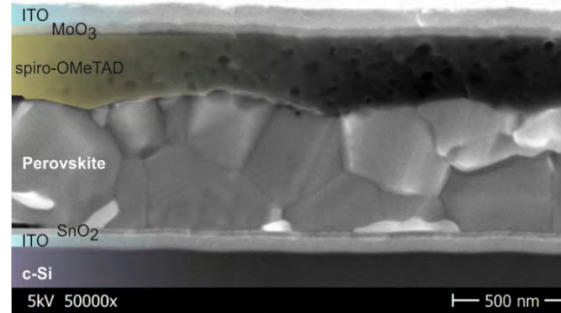
Perovskites



Perovskit: Ein Tandempartner für Si und CIGS



Wirkungsgrad: 19.9 %



Ziele:

**Wirkungsgrad > 30 %
stabil – umweltverträglich -
skalierbar**

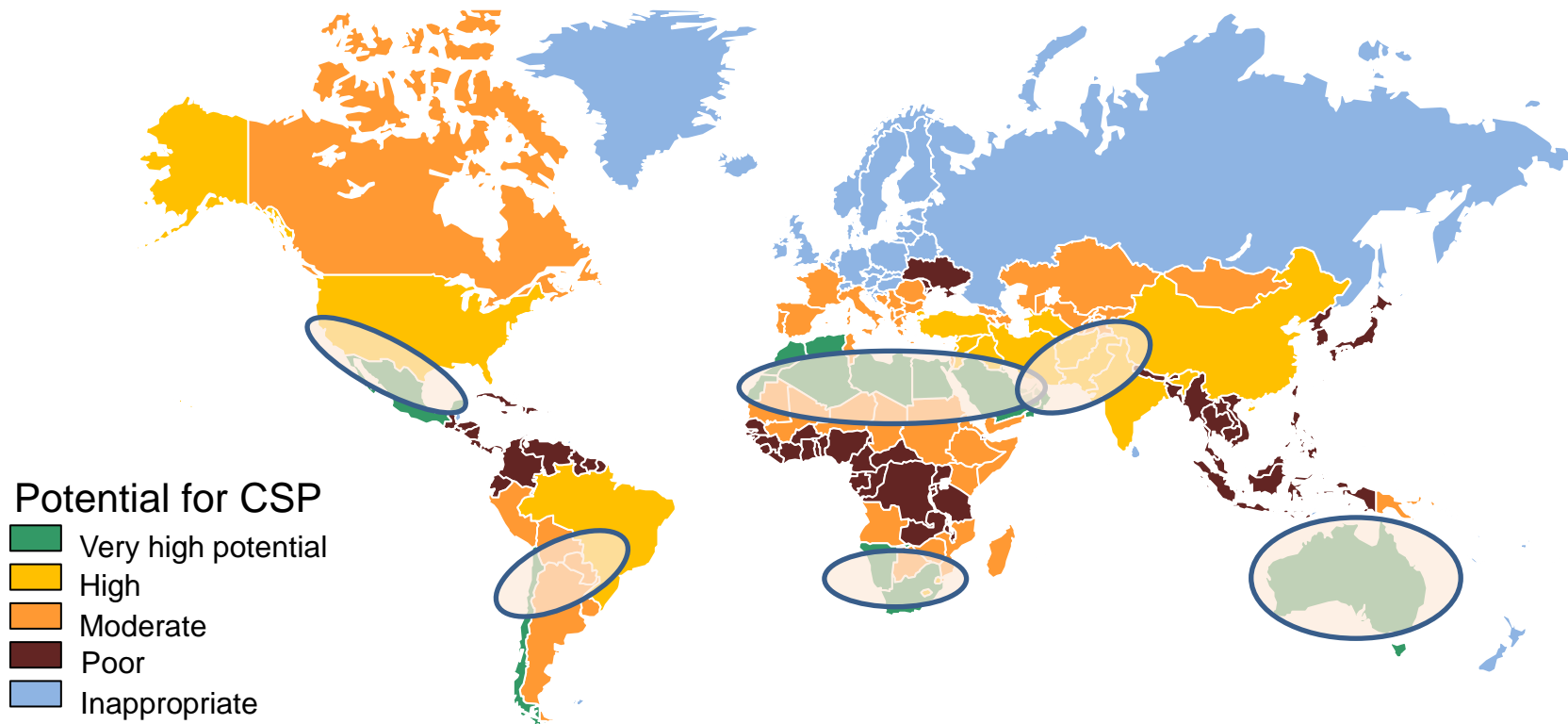


Übersicht

1. Warum Solarenergienutzung massiv ausbauen ?
2. Markt und Kostenentwicklung bei der PV
3. **Markt und Kostenentwicklung bei der CSP mit Speicher**
4. Szenarien für den Mix aus PV und CSP
5. Fazit

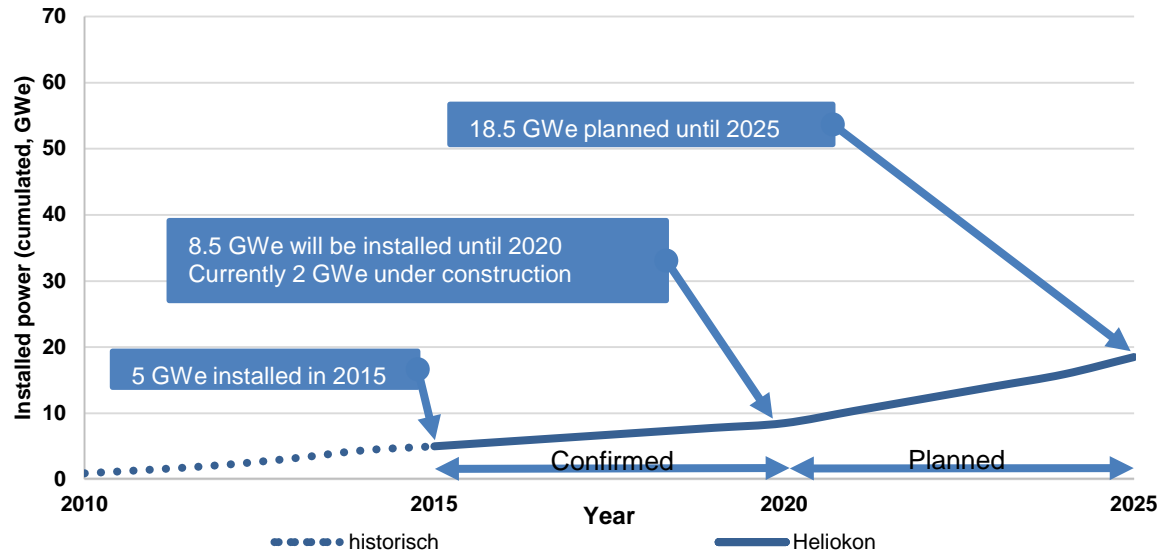


CSP ist nur bei hoher Direktstrahlung einsetzbar



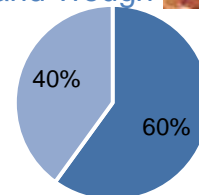
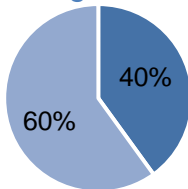
Market forecast CSP 2025

Market forecast CSP 2025



Significant change in market share between Power Tower and Trough

- 2020 Tower
- 2020 Trough



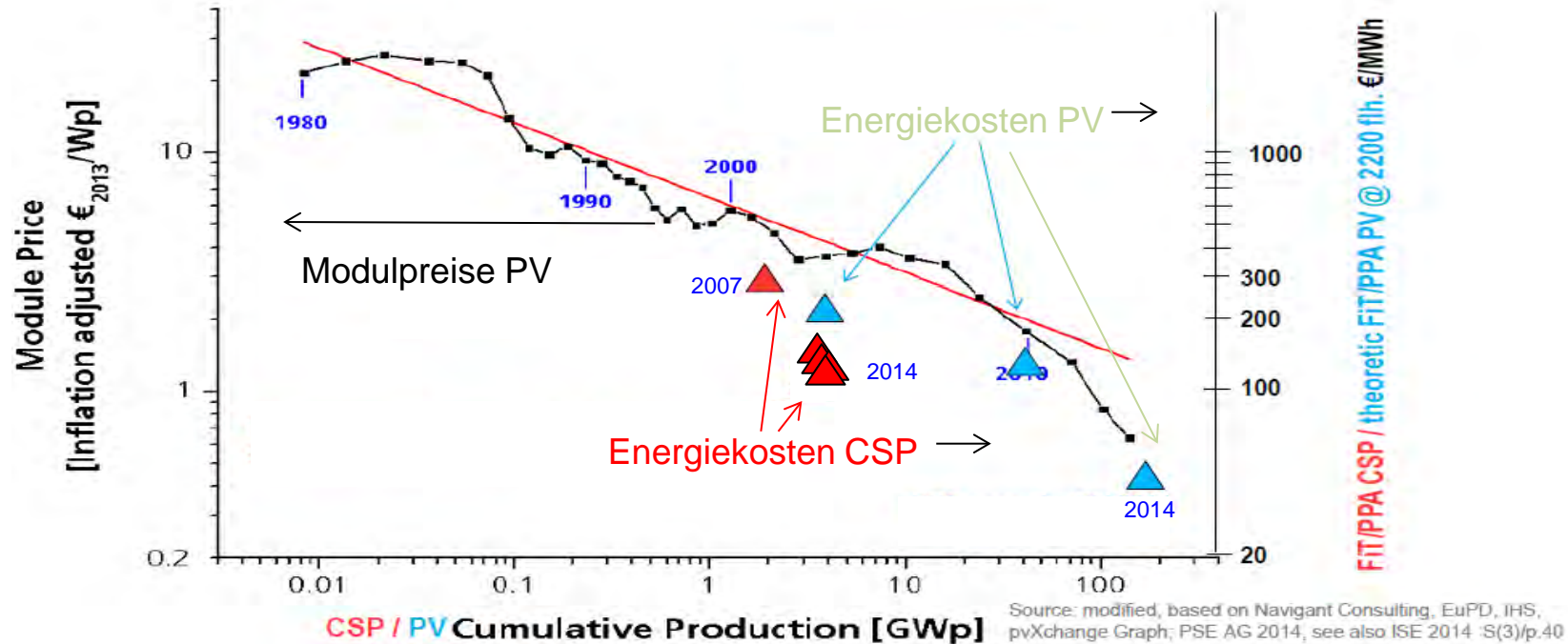
- 2025 Tower
- 2025 Trough



Source: Leoni / Heliokon Analysis, 2016

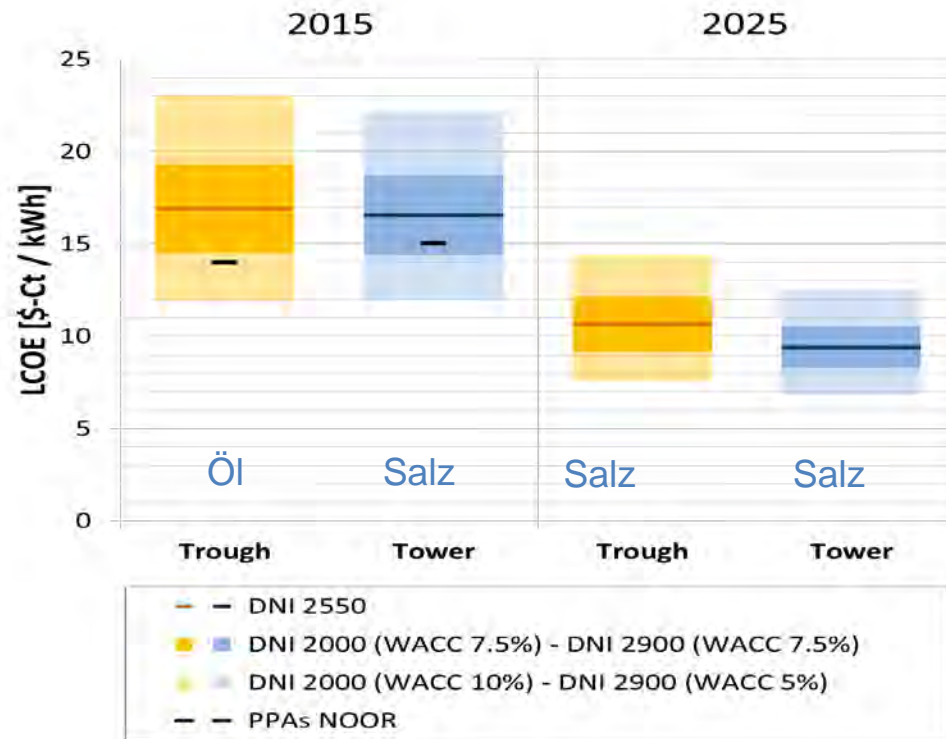
Kosten für CSP und PV sind mit dem Ausbau stark gefallen

- CSP ist bislang weniger stark ausgebaut und daher teurer



IRENA Studie zur Kostensenkung CSP Großkraftwerke

- Kosten stark abhängig von Einstrahlung und Finanzierung
- Kosten < 10 US\$/kWh bis 2025 erwartet für Salztechnologie (Turm und Rinne)
- Damit an guten Standorten wettbewerbsfähig mit Diesel, Biogas, Batteriespeicher und Nuklear-Technologie
- Je nach Entwicklung von Gaspreisen und CO₂ Kosten wettbewerbsfähig mit Gaskraftwerken

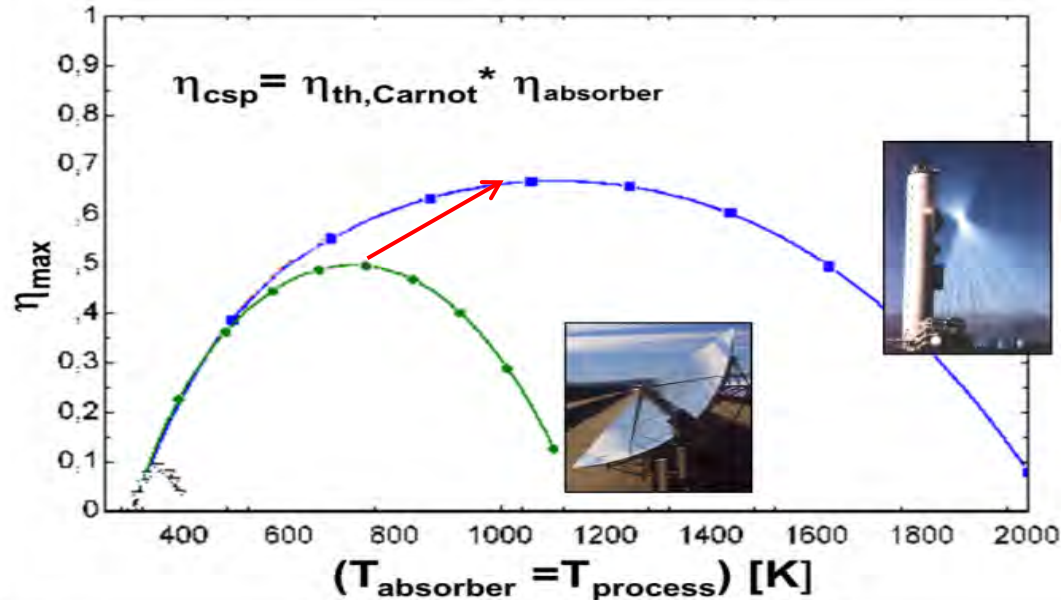


Ausblick CSP Markt bis 2025

- Geschätzte installierte CSP Kapazität bis 2025:
10 - 20 GW (plus 5-15 GW)
- Akkumuliertes, zusätzliches CSP Investment bis 2025:
25 – 75 Milliarden EUR
(davon bis zu 40% an Deutsche Industrie)
- Jährliches CSP O&M Marktvolumen in 2025:
1 – 2 Milliarden EUR pro Jahr
(davon bis zu 25% an Deutsche Industrie)
- Zusätzliche Kapazitäten im Bereich der industriellen Prozesswärme



HGF verfolgt disruptive Ansätze



- Hohe Konzentration und hohe Temperatur = hohe Effizienz
- Überschreitung der heutigen Temperaturgrenze von 550°C

- Turmkraftwerke mit fortschrittlichen Wärmeträgerfluide wie **Salzschmelzen**, **keramische Partikeln** oder **Flüssigmetalle** mit $T > 650^{\circ}\text{C}$ und $\eta_{\text{sys}} > 20\%$

Kostenreduktion bei Solarkraftwerken: Partikelsysteme

- Keramische Partikel als WTM und Speicher
 - z. B. Bauxit, 1mm Ø
- Aufbau eines Prototyp-Receiver
 - $500\text{kW}_{\text{th}}/900^{\circ}\text{C}$
 - „warme“ Labor-Inbetriebnahme mit elektrischer Beheizung erfolgt (bis 400°C)
 - Beginn Solartests im Solarturm Jülich: 5/2017
- Untersuchungen zu Abrieb durch Partikel:
 - Abrieb Partikel/Partikel unkritisch
 - erste Ergebnisse an heißen Metallen zeigen Bedarf an detaillierter Untersuchung

Großinvestition HEHTRES:

- Partikelreceiver-System im Multifokusturm Jülich (1MW_{th} , 900°C)
 - bewilligt (10/2016)
 - Fertigstellung in 2020 geplant



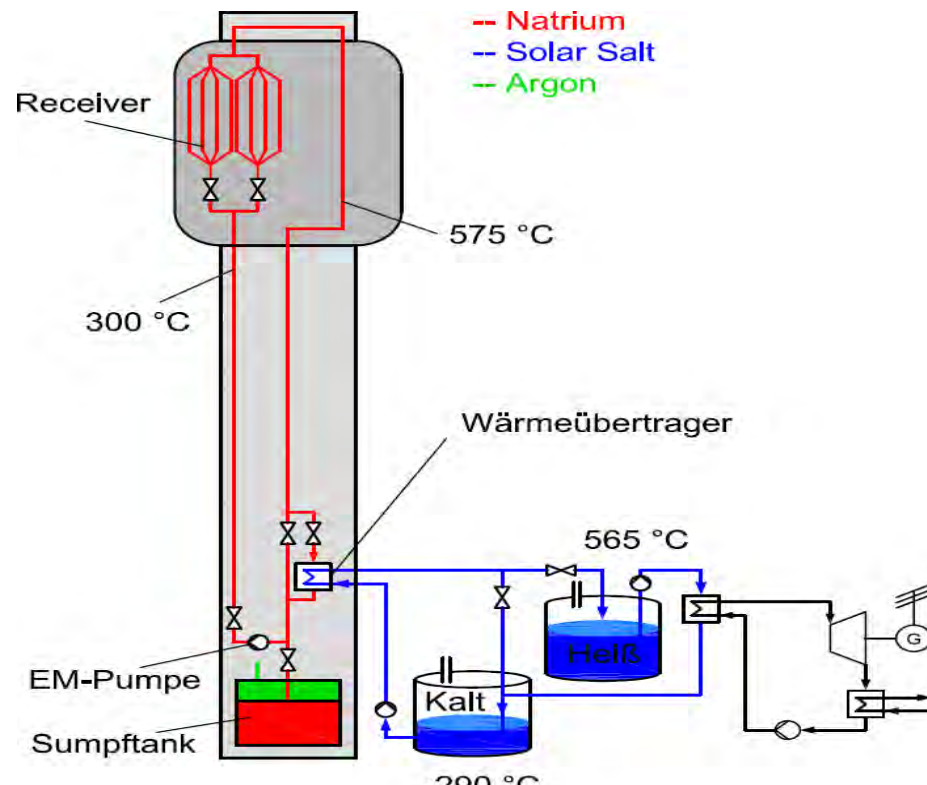
Potentialanalyse für Solarturmsysteme mit Flüssigmetall

Vergleichsstudie mit Solarturm-System mit Flüssigsalz:

- + Höhere solare Flussdichte möglich \Rightarrow kleinerer Receiver
- + Höherer Receiver-Wirkungsgrad
- + Reduzierte Receiverkosten
- + Niedrigere Parasitics (Pumpleistung, Begleitheizung)
- Zusätzlicher Wärmetauscher notwendig

➔ Reduktion der Stromgestehungskosten um 11%

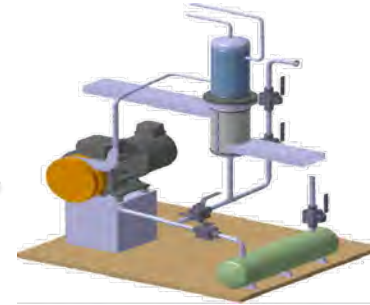
➔ Weitere Vorteile werden bei instationären Vorgängen erwartet (Wolkendurchzug, ..)



Flüssigmetalle für CSP: Umfassender Forschungsansatz

■ Systemkomponenten

- Receiver, Pumpen, Wärmeübertrager, ...
- Messtechnik, Prozesssteuerung, ...



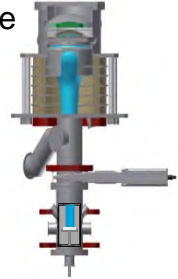
Modulare Na-Kreisläufe
in Kleinserienfertigung

■ Materialforschung

- Pb/PbBi > 550 °C
- Na > 700 °C
- Sn: Graphit, Quartz, ...



Elektronen-Pulsstrahl-Anlage
für Oberflächenlegierungen



■ Alkali Metal Thermal Electric Conversion **AMTEC**

■ Thermische Speicherung

- Direktspeicherung
- Direktspeicherung mit Füllmaterialien
- Indirekte Speicherung



Abstimmung und
Zusammenarbeit



Realisierte AMTEC-
Reaktionszelle

Dynamische Belastungstests
von Proben in flüssigem
Natrium bei 750 °C!



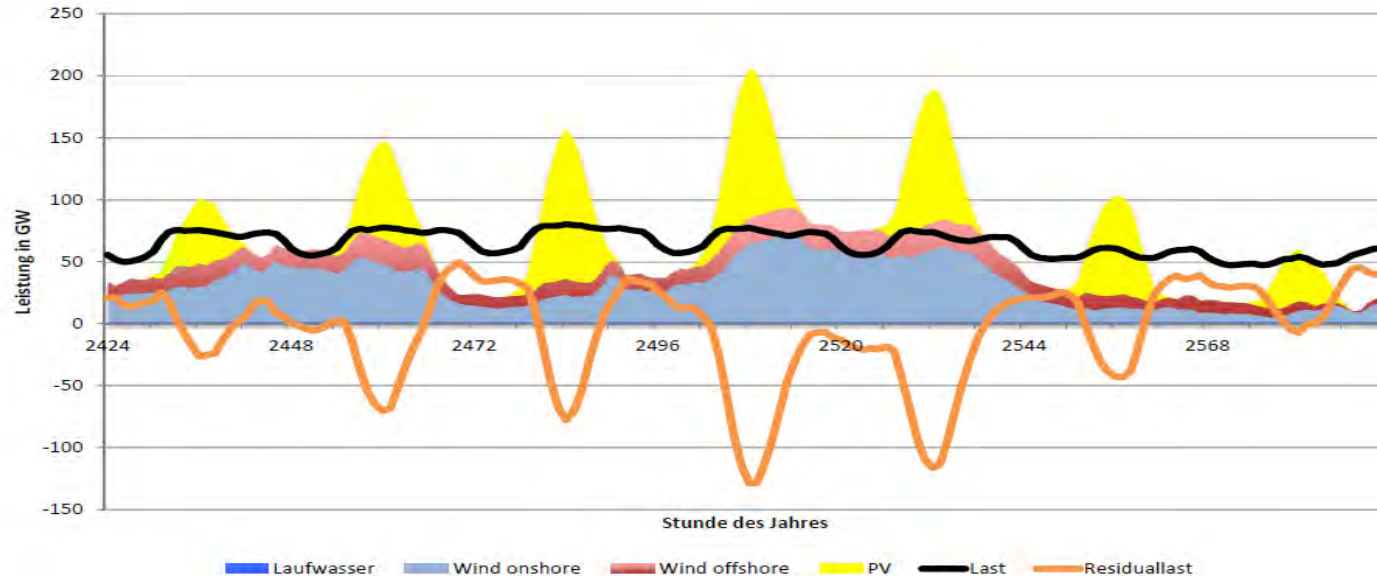
Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt

Übersicht

1. Warum Solarenergienutzung massiv ausbauen ?
2. Markt und Kostenentwicklung bei der PV
3. Markt und Kostenentwicklung bei der CSP mit Speicher
4. **Szenarien für den Mix aus PV und CSP**
5. Fazit

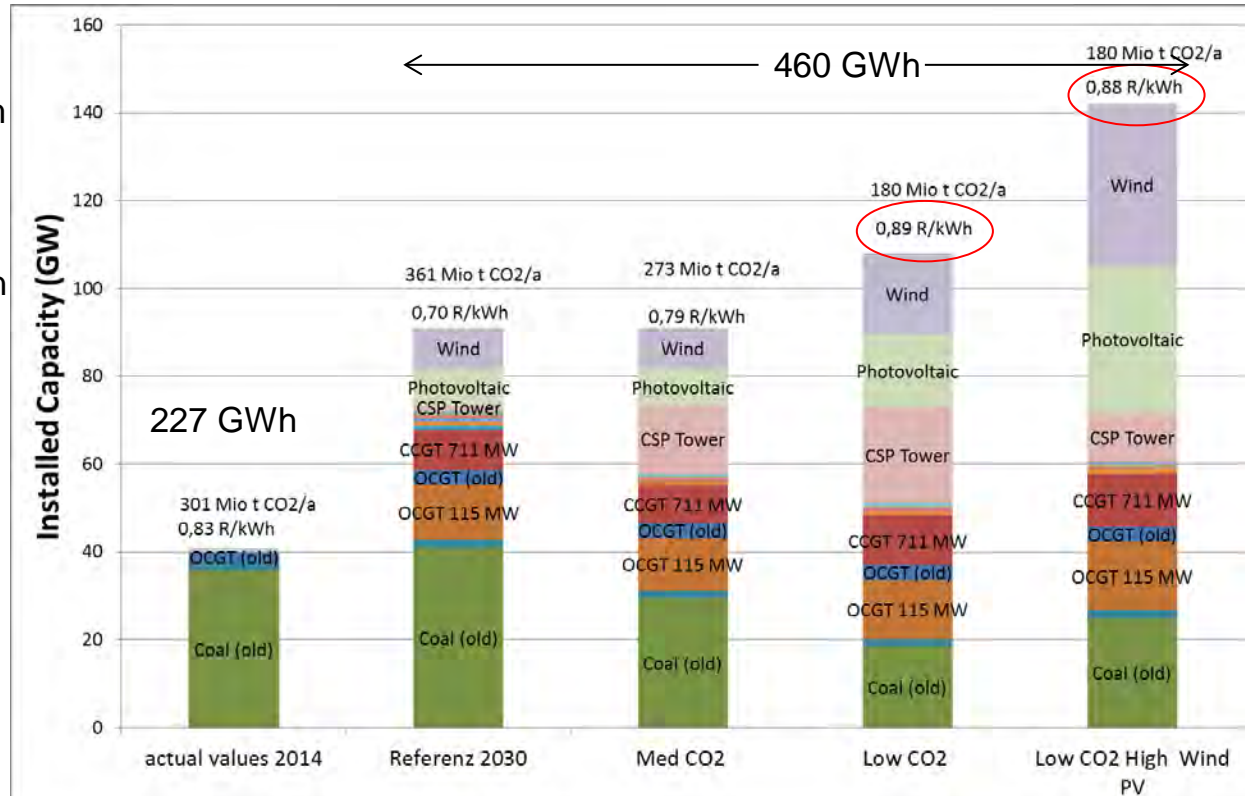


Welchen Technologien decken Residuallast bei hohen Anteilen von fluktuierendem Wind und PV Strom am günstigsten?



Beispiel: Kostenoptimierter Energiemix in Südafrika für 2030

- Kohle und Gas sind die kostengünstigsten Optionen um die Residuallast zu decken
- CSP ersetzt fossile Energieträger falls Klimaschutzvorgaben existieren
- Der optimale Mix von Wind, PV und CSP hängt stark von der Kostenstruktur ab

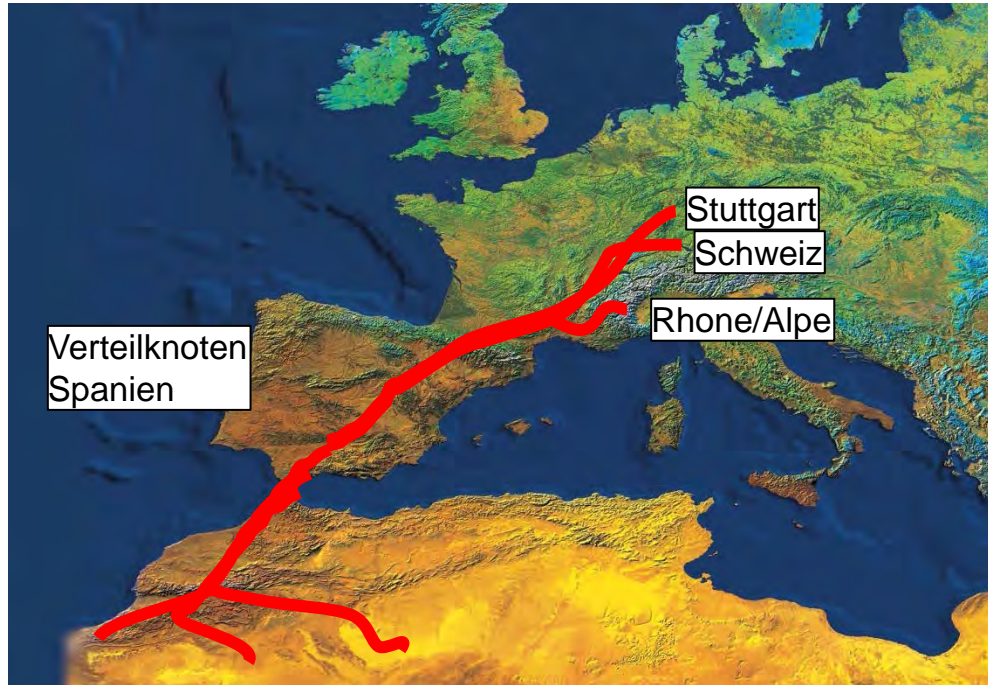


Wirtschaftlichkeit – Deutschland mit und ohne Solarstromimport

- Die Stromversorgung soll zu möglichst kostengünstigen Konditionen erreicht werden.
- Wir vergleichen zwei Szenarien,
 - eines welches Deutschland mit heimischer Solar- und Windenergie versorgen will
 - Eines in dem regelbare Solarstromimporte die heimische Solar- und Windenergie komplementär ergänzen



Solarstromimport



- **Phase I**
Transport von Solarstrom aus Südeuropa in die europäischen Lastzentren
- **Phase II**
Import von ganzjährig regelbarem Strom aus Nordafrika

Deutschland 20XX:

- 90% EE Szenario ohne regelbare Solarstromimporte
375 GW + 40 GW Netz + 40 GW Speicher

Energieträger	Installierte Leistung	Pro Jahr gelieferte Strommenge	Mittlere Auslastung
	MW	TWh/a	h/a
Fluktuierend / Erneuerbar	235500	551.3	
Photovoltaik	100000	98.9	989
Wind Onshore	70000	156.4	2235
Wind Offshore	60000	257.7	4295
Laufwasserkraft	5500	38.2	6951
Regelbar / Erneuerbar	8000	37.9	
Biomasseabfälle, Müll	4000	22.1	5515
Holz, Energiepflanzen, Biogas	4000	15.9	3964
Geothermie		0.0	0
Import Wasserkraft per HGÜ		0.0	0
Import Solarstrom per HGÜ		0.0	0
Fossil / Nuklear	90000	56.4	
Gasturbinenkraftwerke	90000	56.4	627
Kohlekraftwerke	0	0.0	0
GuD und BHKW	0	0.0	0
Kernkraftwerke	0	0.0	0
Braunkohlekraftwerke	0	0.0	0
Speicher und Netztransfer	80000	48.7	
Pump-und Druckluftspeicher	20000	15.7	785
H2-Speicher Leistung	20000	13.8	688
H2-Speicher Kapazität (Tage)	1		
Netztransferkapazität (NTC)	40000	19.3	482
Gesamter Kraftwerkspark	373500	579	1551

- 90% EE Szenario mit regelbaren Solarstromimporten
225 GW + 8 GW Netz + 20 GW HGÜ + 8 GW Speicher

Energieträger	Installierte Leistung	Pro Jahr gelieferte Strommenge	Mittlere Auslastung
	MW	TWh/a	h/a
Fluktuierend / Erneuerbar	117500	288.1	
Photovoltaik	45000	44.5	989
Wind Onshore	40000	89.4	2235
Wind Offshore	27000	116.0	4295
Laufwasserkraft	5500	38.2	6951
Regelbar / Erneuerbar	35000	220.2	
Biomasseabfälle, Müll	4000	30.0	7502
Holz, Energiepflanzen, Biogas	7000	49.8	7112
Geothermie	4000	30.2	7547
Import Wasserkraft per HGÜ	4000	25.8	6462
Import Solarstrom per HGÜ	16000	84.3	5271
Fossil / Nuklear	65000	54.4	
Gasturbinenkraftwerke	65000	54.4	837
Kohlekraftwerke	0	0.0	0
GuD und BHKW	0	0.0	0
Kernkraftwerke	0	0.0	0
Braunkohlekraftwerke	0	0.0	0
Speicher und Netztransfer	16000	3.1	
Pump-und Druckluftspeicher	7500	1.9	255
H2-Speicher Leistung	0	0.0	0
H2-Speicher Kapazität (Tage)	0		
Netztransferkapazität (NTC)	8500	1.1	135
Gesamter Kraftwerkspark	225000	561	2494



Effiziente Gestaltung der Energiewende

➔ Bedeutung gut regelbarer Solarstromimporte zur Entlastung der Energiewende:

bis zu 5 mal weniger Netze

bis zu 5 mal weniger Speicher

bis zu 150 GW weniger Kraftwerke



Übersicht

1. Warum Solarenergienutzung massiv ausbauen ?
2. Markt und Kostenentwicklung bei der PV
3. Markt und Kostenentwicklung bei der CSP mit Speicher
4. Szenarien für den Mix aus PV und CSP
5. Fazit



Übersicht

1. Warum Solarenergienutzung massiv ausbauen ?
2. Markt und Kostenentwicklung bei der PV
3. Markt und Kostenentwicklung bei der CSP mit Speicher
4. Szenarien für den Mix aus PV und CSP
5. **Fazit**



Fazit

- Nutzung von Solarenergie bietet eine schnell zu realisierende, kostengünstige Option um den Einsatz von fossiler Energie massiv zu senken
- PV und CSP mit Speicher und Hybridisierung sind komplementäre Technologien:
 - PV stellt Energie bereit,
 - CSP Energie + gesicherte Leistung
- PV Markt boomt da heute schon häufig kostengünstigste Option,
- CSP am Anfang der Lernkurve: weitere Kostensenkung wird erwartet
- CSP in vielen Regionen sinnvolle Ergänzung um klimaneutral Versorgungssicherheit zu erzielen
- Import von kostengünstigem regelbarem Strom kann mittelfristig auch für Deutschland relevant werden





Danke für Ihre Aufmerksamkeit

Kontakt: robert.pitz-paal@dlr.de

Backup Slides



1 Evidence from recent projects highlights improvement of solar PV projects beyond published studies

Sample of recent solar PV bids & associated LCOEs



Source: Press releases; A.T. Kearney

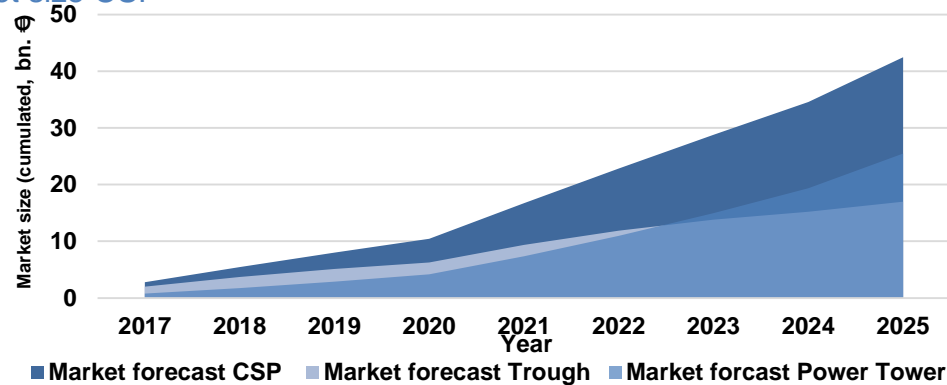
Aktuelle CSP Strompreise für Turmkraftwerke (in US\$/kWh)

Project	Country	MWe	Storage capacity	Energy cost (LCOE)	Status	Completion date
Crescent Dunes	U.S.	110	10 hours	\$169/MWh	Operation	Q4 2015
Noor III	Morocco	150	7.5 hours	\$163/MWh	Construction	Q4 2017
Redstone	South Africa	100	12 hours	\$125/MWh (PPA to be signed)	Development	Q3 2018
Crete CSP Plant	Greece	50	5 hours	\$310/MWh	Development	2019
DEWA CSP Project Phase I	U.A.E.	200	12 hours	\$80/MWh (targeted)	Planning	Q2 2021
Copiapo	Chile	240	14 hours	\$63/MWh (bid)	Planning	TBA

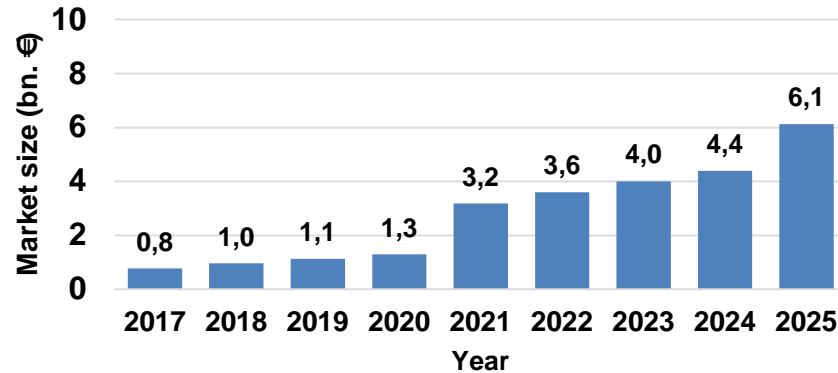


Globaler Umsatz CSP Turmtechnologie bis 2025

Cumulated entire market size CSP



Annual market size Power Tower



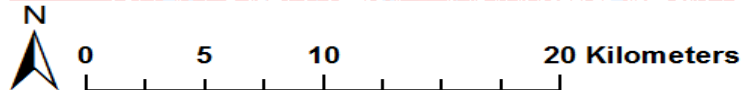
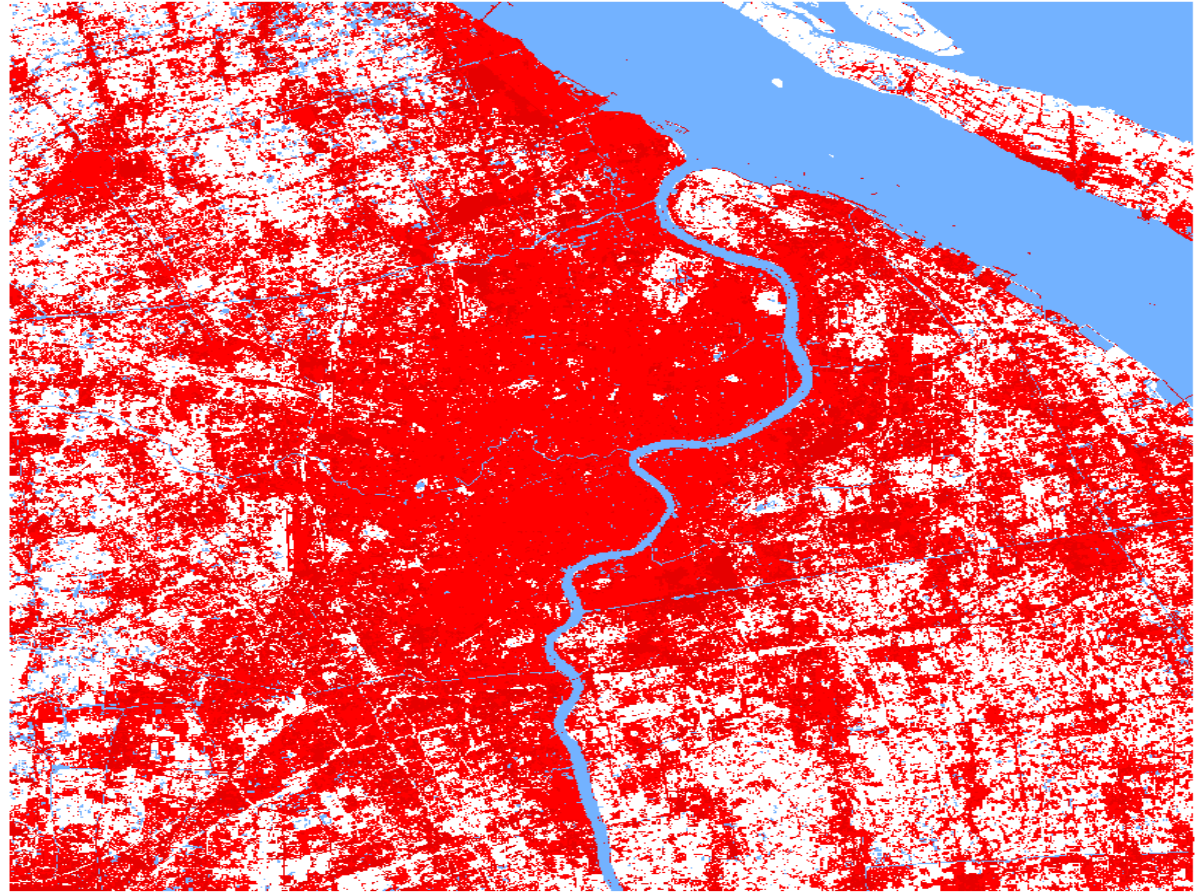
Urbanes Wachstum

Shanghai 1975

Shanghai 1990

Shanghai 2000

Shanghai 2010

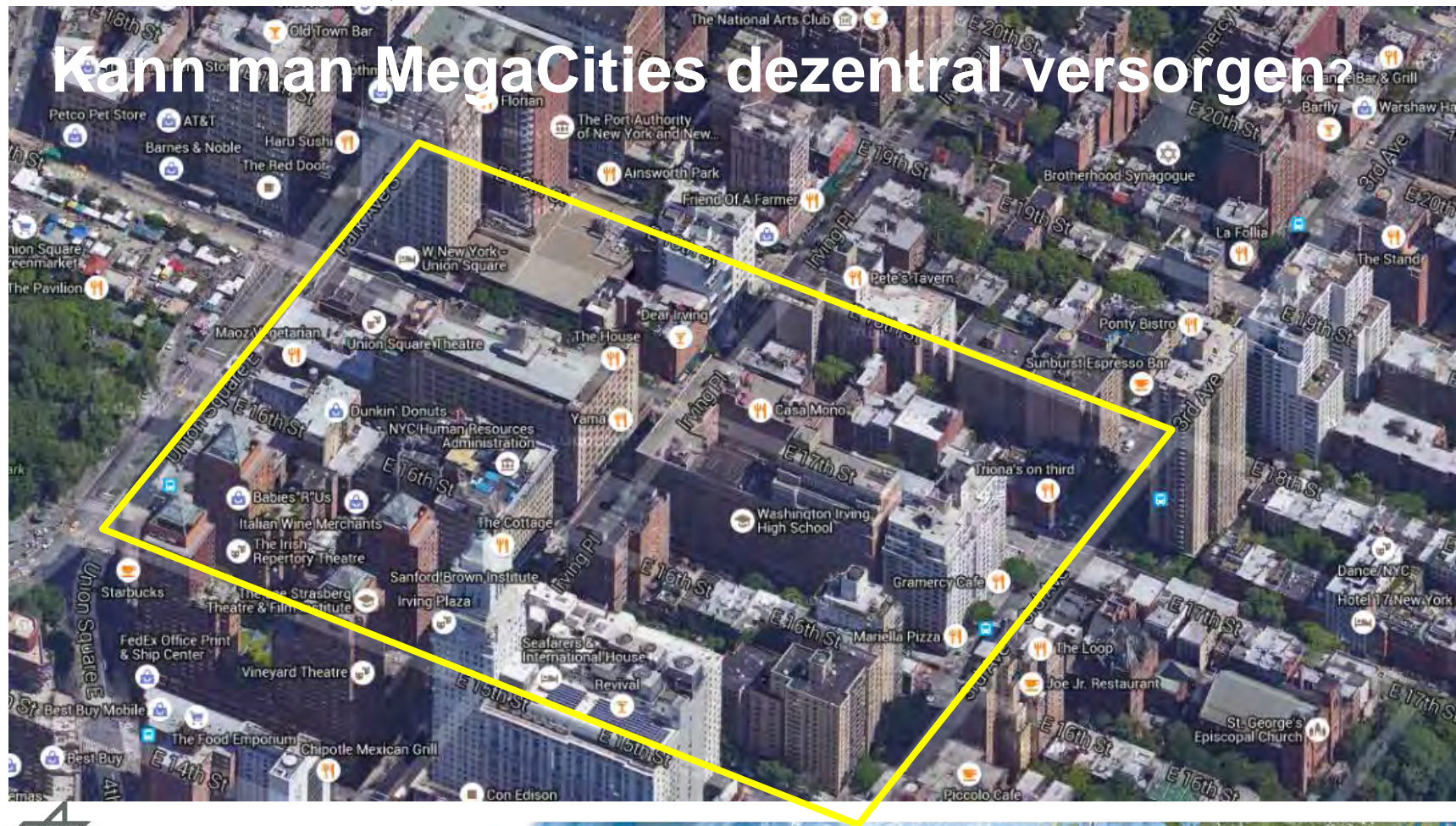


Fakten

- 1800, lebten nur 3% der Weltbevölkerung in Städten
- Zum Ende des 20'zigsten Jahrhunderts lebten bereits 47% der Weltbevölkerung in Städten
- 1950, gab es 83 Städte mit mehr als 1 Millionen Einwohner
- 2007, waren es bereits 468
- Der Trend hält an und die Weltbevölkerung verdoppelt sich alle 38 Jahre
- Die UN sagt voraus, dass 2030 60% der Weltbevölkerung (5 Mrd. Menschen) in Städten leben wird



Kann man MegaCities dezentral versorgen?



New York City, Manhattan

Nutzbare Stadtfläche

- max. 30%
- Realistisch gemäß einer Studie der TU Berlin für den Großraum Berlin ca. 10-20% (Quelle: www.pvupscale.org)



**2050 leben ca. 75% der Weltbevölkerung
auf weniger als 2,8% der Erdoberfläche!**

**Diese Ballungsräume werden sich NICHT
ausschließlich dezentral versorgen lassen!**

Taubenböck H (2015): *Ohne Limit? Das Flächenwachstum der
Megacities.*

